

도심형 수소연료전지 카고 바이크 디자인 개발에 관한 연구

Design Development of Urban Hydrogen Fuel Cell Cargo Bikes

주 저 자 : 오세빈 (Oh, Sevin) 국립창원대학교 산업디자인학과 강사

공 동 저 자 : 천태림 (Cheon, Tae Rim) 국립창원대학교 산업디자인학과 석사과정

교 신 저 자 : 송상민 (Song, Sangmin) 국립창원대학교 산업디자인학과 교수
songsang@changwon.ac.kr

<https://doi.org/10.46248/kidrs.2026.2.333>

접수일 2026. 05. 20. / 심사완료일 2026. 05. 26. / 게재확정일 2026. 06. 08. / 게재일 2026. 06. 30.

Abstract

This study proposes an optimized 4-wheel hydrogen fuel cell cargo bike to address the growth of last-mile logistics and urban carbon neutrality. Integrating a high-density, eco-friendly hydrogen power system offering instant refueling and space efficiency, the design maximizes the operational efficiency of a 4-wheel platform for urban freight transport. The research followed a three-stage process: case analysis, design development, and feasibility review. Based on an analysis of the logistics environment, the final design incorporates a low-step frame and a rear-sliding swappable hydrogen cartridge slot. The resulting design and packaging structure provide a practical reference and foundation for commercializing eco-friendly hydrogen cargo bikes.

Keyword

Hydrogen fuel cells(수소연료전지), 4-wheel cargo-bike(4륜 카고바이크), Last mile logistics(라스트마일 물류)

요약

본 연구는 라스트마일 물류 시장의 급성장과 도심 내 탄소중립 실현에 대응하기 위해, 최적화된 4륜 수소연료전지 카고바이크 디자인을 제안한다. 고밀도 친환경 에너지원인 수소 동력 시스템은 즉각적인 연료 보충과 뛰어난 공간 효율을 제공하여, 도심의 화물 운송에 요구되는 4륜 플랫폼의 운영 효율성을 극대화한다. 연구는 사례 분석, 디자인 전개, 타당성 검토의 3단계로 진행되었다. 특히, 잦은 승하차와 하역 작업 등 물류 환경의 특성을 분석하여, 이를 바탕으로 저상형(low-step) 프레임과 후면 슬라이딩 방식의 수소 카트리지 슬롯이 결합된 시안을 도출하였다. 연구에서 도출된 디자인 시안과 패키징 구조는 향후 수소 카고바이크 상용화를 위한 기초자료로 활용될 수 있으며, 친환경적 전환을 돕는 실무적 참고 사례로서 기여할 수 있을 것이다.

목차

1. 서론

- 1-1. 연구의 배경 및 목적
- 1-2. 연구의 방법과 범위

2. 수소연료전지와 카고바이크에 대한 고찰

- 2-1. 자전거의 분류와 카고바이크
- 2-2. 운용 중인 카고바이크의 특징
- 2-3. 전기자전거와 수소연료전지 자전거 시스템

3. 디자인 방향 설정

3-1. 정량 구조에 따른 제원 검토

3-2. 수소연료전지 4륜 카고바이크 디자인 방향 설정

4. 디자인 실행

- 4-1. 아이디어 스케치 전개
- 4-2. 디자인 시안과 탑승자세
- 4-3. 최종 디자인
- 4-4. 디자인 검토

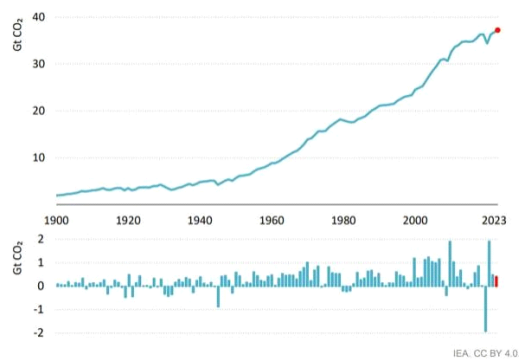
5. 결론 및 제언

참고문헌

1. 서론

1-1. 연구의 배경 및 목적

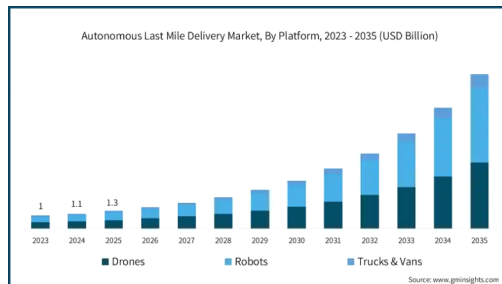
현재 전 세계는 생성형 AI의 가속적인 발전과 함께 전례 없는 에너지 수요 급증 및 탄소발자국의 증가라는 현실적인 문제에 직면해 있다. 국제 에너지 기구(IEA)의 리포트에 따르면,¹⁾ 1900년 이후 전 세계 에너지 관련 이산화탄소 배출량은 지속적인 상승 곡선을 그리며 환경위기를 심화시키고 있다. 이러한 맥락에서 딜로이트(deloitte)가 발간한 '2025 글로벌 순환 경제 리포트'는 화석 연료 기반의 시스템에서 탈피하여, 전기 및 청정에너지 중심의 탈탄소 시스템으로의 전면적인 전환을 강조하고 있다.²⁾



[그림 1] 국제에너지기구(IEA)

이러한 기조는 산업 전반에 걸쳐 변화를 촉구하고 있다. 유럽의 일부 국가에서는 환경오염 저감과 문화유산 보호를 위해 도심 내 저배출 구역 및 차량 통행 제한 구역을 광범위하게 운영 중이다. 이에 따라, 도심 물류 시스템에서의 친환경 이동 수단 도입은 지속 가능한 물류 생태계 구축을 위한 핵심 전략으로 자리 잡고 있다. 최근 물류 산업에서는 소비자 접점의 최종 단계를 의미하는 '라스트 마일(last-mile)'배송 시장이 급격히 성장함에 따라, 기존의 내연기관 화물차를 대체할 수 있는 고효율, 친환경 마이크로 모빌리티(micro mo-

bility)를 현장에 도입하고³⁾ 그 실효성을 검증하려는 다각적인 시도가 전개되고 있다⁴⁾.



[그림 2] 라스트 마일 배송 시장 규모 (2023-2035)

본 연구의 목적은 차세대 친환경 에너지원인 수소 연료전지(hydrogen fuel cell) 기술을 접목한 도심형 카고 바이크 디자인을 제안하는 것이다. 특히 수소 시스템의 구조적 특성을 반영하여, 기술적 타당성과 디자인 완성도가 고도화된 '도심형 수소 카고바이크'의 최종 시안을 도출하는 데 주안점을 두었다.

1-2. 연구의 방법과 범위

연구의 방법은 '사례 연구', '디자인의 실행', '디자인 검토'의 3단계 과정을 거쳐 진행되었다.

첫째, 사례 연구 단계에서는 문헌 연구를 통해 국내외 카고 바이크의 유형별로 분류하고 탑승 자세를 확인하였다. 그리고 기존 전기 구동 시스템과 수소 연료전지 시스템의 구조를 비교 분석하였다. 이를 통해 고밀도 에너지원인 수소가 지나는 차체 경량화 및 공간 효율성의 이점을 파악하였으며, 이를 바탕으로 본 연구의 구체적인 디자인 방향을 설정하였다.

둘째, 디자인 실행 단계에서는 앞선 분석 결과를 바탕으로 도심 물류에 최적화된 4륜 카고 바이크의 디자인 방향성을 설정하였다. 수소 연료전지 패키지의 효율적인 배치를 고려한 저중심 설계 및 적재 효율 극대화를 위한 구조적 아이디어를 전개하였으며, 스케치와

1) 국제에너지기구(IEA), CO2 Emissions in 2023, (2026.05.02.), www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023

2) 딜로이트(Deloitte), 2025 글로벌 순환경제 리포트, (2026.05.02.), www.deloitte.com/kr/ko/services/firmwide-integrated-services/research/2025-global-circular-economy-report.html

3) 우종운, 유시복, '언택트 시대, 라스트 마일 자율주행배송', 한국자동차공학회, 오토저널, 2020, p.61

4) Global Market Insights, Autonomous Last Mile Delivery Market, (2026.05.02.), www.gminsights.com/ko/industry-analysis/autonomous-last-mile-delivery-market

3D 모델링을 통해 수소 동력계의 특성이 시각적으로 구현된 디자인 시안을 도출하였다.

마지막으로 디자인 검토 단계에서는 도출된 시안에 대한 종합적인 디자인 분석 및 평가를 진행하였다. 축소 스케일 모형을 활용한 목업 제작 및 형태 검토를 통해 형태적 비례와 구동 부품의 배치 상태를 입체적으로 확인하였다. 이어서 가상의 도심 배송 환경을 설정하여 작업 시나리오 및 적용 가능성 검토를 진행하였으며, 이를 통해 실제 물류 환경에서의 동선 효율성과 실효성을 종합적으로 가능하였다. 최종적으로, 설정된 디자인 평가 항목에 따른 객관적 분석을 통하여 제안된 디자인의 형태적, 기능적 완성도를 다각도로 검토하였다.

본 연구의 범위는 도심 물류 환경에 최적화된 마이크로 모빌리티로서 4륜 기반의 카고 바이크를 주된 대상으로 한다. 특히 기존 리튬이온 배터리 시스템의 중량 및 충전 효율 문제를 극복하기 위해, 동력원을 수소 연료전지 시스템으로 전환하고 해당 시스템의 구조적 특성을 제품 외형 및 레이아웃에 반영한 디자인 시안을 제안하는 데 중점을 둔다.

2. 수소연료전지와 카고바이크에 대한 고찰

2-1. 자전거의 분류와 카고바이크

자전거는 목적, 기능, 사용 환경에 따라 다양하게 분류할 수 있다. 이시창(2011)의 연구를 참고하여 자전거를 핵심 용도에 따라 분류하면 도로용, 산악용, 생활용, 특수용으로 재분류하였다.⁵⁾[표 1]

[표 1] 자전거의 분류

용도	명칭	특징
도로용	Road Bike	속도를 중요시하며, 도로지형에 특화
산악용	MTB	충격완화를 중요시하며, 산악지형에 특화
생활용	더치 자전거	상체를 곧게 세우는 직립 자세로 시야 확보와 편안함을 우선시하는 자전거
	크루저 자전거	편안한 주행 자세를 유도하는 넓은 핸들과 독특한 프레임이 특징인 자전거
	도심형 바이크	승하차가 편리하도록 디자인. 공유 자전거의 형태와 같음.

5) 이시창, '자전거 유형별 디자인 형태 분석에 관한 연구 : 선행 요소 중심으로', 한국디자인문화학회, 한국디자인문화학회지, Vol.17, No.1, 2011. 03. p.436.

특수용	하이브리드	로드바이크와 MTB의 장점을 결합. 다양한 환경을 고려
	미니벨로	작은 사이즈로 운반이 편리.
	세마-리컴번트	등받이가 있으나 완전한 리컴번트보다 상체가 약간 세워진 형태의 자전거
	리컴번트	뒤로 눕혀진 등받이가 특징인 장거리 운행용
	BMX	요기 위주의 X게임 목적에 특화
	카고 바이크	짐을 운반하기 위한 목적에 특화

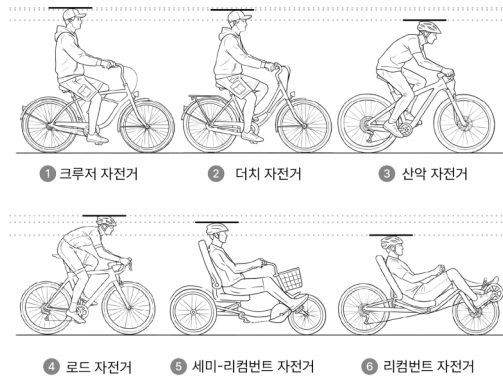
카고바이크는 주로 다양한 무게와 형태의 짐을 운반하는 데 그 목적이 있다. 런던 교통공사(TfL)는 [표 2]와 같이 적재 방식과 차체 구조에 따라 크게 6가지 유형으로 세분화하였다. 일반 자전거 형태의 메신저, 이륜 기반의 전방 적재형 카고바이크와 후방 적재형 카고바이크, 삼륜 기반의 전방 적재형 카고트라이크와 후방 적재형 카고트라이크, 그리고 별도로 결합하여 견인하는 형태의 트레일러로 구분하고 있다.

[표 2] 형태 별 카고바이크의 적재용량과 폭

구분	사진	적재 용량 및 부피	폭
메신저 자전거		20-40kg 0.03-0.05 m³	50 cm
전방 적재형 (역삼륜)		100-200 kg 0.2-0.6 m³	80-90 cm
전방 적재형 (이륜)		100-125 kg 0.1-0.7 m³	50-90 cm
후방 적재형 (삼륜)		200-300 kg 0.5-1.5 m³	80-120 cm
후방 적재형 (이륜)		100 kg 0.4-0.8 m³	50 cm
트레 일러		60-50 kg 0.2-2.1 m³	80-110 cm

배송지마다 짐을 싣고 내리는 행위가 빈번하게 발생하는 물류 업무의 특성에 따라서 카고바이크의 프레임ジオ메트리 설계는 안전하고 편리한 승하차를 우선으로 고려해야 한다. 그리고 무거운 적재 상태에서조차 주행 중 신체적 피로도를 최소화하고 편안함을 유지할 수 있는 인체공학적인 탑승 자세가 보장되어야 한다. 이는

탑승자의 자세에 직접적인 영향을 미치며, 자전거의 유형과 주행 목적에 따라 크게 달라진다. 각 자전거의 특성에 따른 탑승 자세는 [그림 3]과 같이 정리하였다.



[그림 3] 자전거 유형에 따른 탑승자의 자세

2-2. 운용 중인 카고바이크의 특징

기존 이론 기반의 화물 자전거는 신호 대기나 화물 상하차 시 작업자가 직접 무거운 차체의 균형을 지탱해야 하므로 육체적 피로도가 매우 높고, 삼륜 기반 카고바이크의 경우 코너링 시 높은 곳에 적재된 화물의 무게로 인해 원심력이 크게 쏠리며 차량이 전도될 위험성을 내포하고 있다. 반면, 4륜 카고바이크는 네 개의 바퀴가 지지하는 넓은 윤거를 통해 주행 및 정차 시 구조적 안정성을 제공한다.⁶⁾

유럽을 중심으로 도심 내 내연기관 화물차의 대안으로 부상한 전기 카고바이크는 도심 물류에 최적화된 플랫폼으로 발전하고 있다.⁷⁾ 최근의 전기 카고 바이크는 물류 효율성과 사용자 편의성을 극대화하기 위해 구조적, 인간공학적 발전을 보인다. 우선, 적재 효율과 주행 안정성을 확보하기 위해 표준 규격의 팔리컨 박스나 택배 상자를 차체 후면에 직관적으로 적재할 수 있는 리어 로드(rear-load) 방식이 보편화되었으며, 고중량 화물 적재 시 발생하는 진동과 충격을 제어하기 위해 독립 현가장치(suspension)를 결합하는 설계가 주를 이룬다.

배송 업무의 특성상 빈번하게 발생하는 승하차 시의 신체적 부하를 줄이기 위해 프레임 중앙부를 낮게 설계한 스텝 스루(step-through) 구조를 채택함으로써 작업자의 무릎 및 관절 피로도를 최소화하는 인간공학적 배려를 더하고 있다. 이와 함께 중량물인 배터리와 모터를 차체 하단에 배치하는 저중심 설계를 통해 대형화된 차체의 주행 안정성을 확보하고 있다.[표 3]

[표 3] 라스트마일 전기 카고바이크 운용 사례

기업/제조사 이미지	전장/전폭/전고	적재 하중, 적재 부피	특징
UPS/e퀵드 	3,020mm/ 910mm/ 1,950mm	210kg 2.0m ³	친환경 배송 전기자전거
Antric/ Maxion Wheels 	983mm/ 999mm/ 1,951mm	290kg 2.2m ³	안정성 및 적재 효율 강조
Amazon/ Fernhay EAV 	2,740mm/ 1,040mm/ 1,950mm	170kg 2.0m ³	대형 및 친환경 배송 시스템
DHL/Flevobike 	860mm/ 컨테이너: 800x1200x10 00mm	125kg 1.0m ³	탈착식 모듈형 컨테이너 운송
DPD/ ONO-MOTION 	3,400mm/ 1,125mm/ 2,050mm	200kg 2.0m ³	대용량 교체형 카고박스 및 마이크로 디포 연계

2-3. 전기자전거와 수소연료전지 자전거 시스템

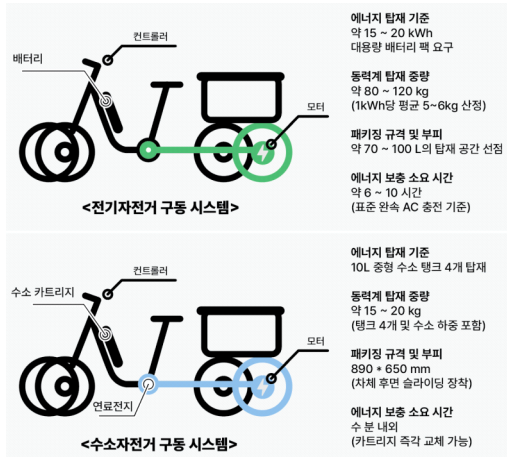
기존의 리튬이온 배터리 기반 전기 구동 방식은 주행거리 연장에 따른 무게와 부피 증가, 긴 충전 시간으로 인해 상업용 물류 환경에서 운송 효율성을 저해한다. 반면, 교체형 수소 탱크와 연료전지 스택을 적용한 수소 시스템은 배터리 공간을 대체하여 차체 경량화가 가능하다. 이는 4륜 카고 바이크의 적재 능력을 극대화하는 데 유리하다.[그림 4]

상업용 물류 모빌리티는 고중량 화물 운송과 복잡한 도심 주행을 위해 높은 에너지 밀도와 운영 효율성이 필수적이다. 수소와 산소의 화학 반응으로 직접 전력을 생산하는 수소 시스템은 기존 에너지원 대비 에너지

6) Katherine Orchard, Celine Cluzel, 『Cycle Freight Study』, Transport for London, 2018, pp.24-27.

7) 김성민, 오관용, 신지환, 박성근, 김대진, ‘전기 카고바이크 도입에 따른 사회적 편익 분석: 김천시 도심형 카고바이크 배송 실증사업 사례를 중심으로’, 한국물류과학기술학회, 물류과학기술연구, 2025, p.2

저장 밀도가 뛰어나 동일 중량 기준으로 크게 확장된 장거리 주행 능력을 제공한다.⁸⁾ 더불어 수소 동력계는 구동 과정에서 부산물로 순수한 물(H₂O)만을 배출하므로 도심 내 완전한 탄소 중립을 실현할 수 있다.⁹⁾



[그림 4] 500km 주행 기준 동력 시스템 제한 비교

결과적으로, 고밀도 에너지를 바탕으로 한 지속적인 고출력과 빠른 연료 보충 기능은 라스트마일 도심 물류 환경의 까다로운 요구 조건을 충족할 수 있는 최적의 동력원 체계라 할 수 있다.

3. 디자인 방향 설정

3-1. 정량 구조에 따른 제한 검토

본 연구는 공동연구 기업인 'E'사의 개발진과의 협업을 통해 소형 수소연료전지 물류 자전거의 목표 제한을 설정하고, 세부 내용을 [표 4]와 같이 정리하였다.

구동시스템은 4개의 인휠 모터(in-wheel motor)를 장착한 4륜 구동 방식을 채택하였다. 이는 높은 등판 성능을 확보하고 화물 적재 시 하중을 안정적으로 지

8) 이수빈, 임옥택, 'The Optimization on Fuel economy of Hydrogen Fuel Cell Bicycle Performance Based with Driving Analysis', 한국자동차공학회, 한국자동차공학회 지회 학술대회 논문집, 2024, p.23

9) 에너지경제연구원, 수소경제 활성화 로드맵에 따른 모빌리티 분야 파급효과, (2026.05.02.), www.keei.re.kr/web_keei/d_results.nsf/0/12345

지하며, 주행 중 흔들림을 최소화하여 다양한 운행 환경에 대응하기 위함이다.

차체의 치수 제한은 유럽의 카고바이크 규격 및 표준을 준용하였다. 전체 길이는 약 250cm, 폭은 100cm, 휠 사이즈는 20인치로 설정하였다. 최대 하중은 총 500kg(차체 100kg, 탑승자 100kg, 화물 300kg)을 수용할 수 있는 구조로 계획하였다.

[표 4] 목표 제한

구분	주요 항목	목표 사양	비고
구조 (structure)	바퀴 방식	4륜 방식, 휠사이즈 20inch	고하중 지지 및 주행 안정성
구동 (driving)	모터 방식	4륜 인휠 모터	등판각 극복 및 구동력 분산
규격 (size)	전체 크기	전장 약 250cm, 전폭 약 100cm, 높이 약 180cm,	유럽 국가 카고바이크 기준 준용
중량 (weight)	적재 하중	총 500kg (차체 100kg, 탑승자 100kg, 화물 300kg)	유럽 국가 규제(300kg) 대응
소재 (material)	프레임 소재	재생 카본 (recycled carbon) + 알루미늄	친환경성 및 경량화
에너지 (energy)	수소 탱크	10L 용량 (3~4개 탑재)	'E'사 개발 모델 기준
인체공학 (ergo)	좌석 형태	리컴벤트(recumbent) / 업라이트(upright)	선택형 안장 시스템

사용 편의성과 범용성을 고려하여 설계하였다. 좌석은 운용 목적에 따라 리컴벤트(recumbent) 방식과 화물 하역이 용이한 업라이트(upright) 방식을 선택적으로 적용할 수 있도록 하였다. 또한, 카고 박스는 물류 현장부터 개인 용도까지 다양한 수요에 대응할 수 있도록 모듈러(modular) 방식을 채택하였다.

에너지 및 적재 시스템은 'E'사의 10L 수소 탱크 4개를 탑재하는 구조로 구성하였다. 장거리 주행 안정성을 확보하고자 연료 탱크를 교체 및 충전이 용이한 위치에 배치하였으며, 이를 통해 디자인 완성도와 유지보수 편의성을 동시에 도모하였다.

끝으로, 차체 소재는 환경 지속가능성과 브랜드 정체성을 고려하여 재생 카본과 알루미늄 혼용을 설정하였다.

3-2. 수소연료전지 4륜 카고바이크 디자인 방향 설정

본 연구는 도심 라스트마일 물류 환경, 수소 연료전

지의 에너지 효율성, 그리고 4륜 카고 바이크의 구조적 특성을 종합하여 다음과 같이 3가지로 디자인의 방향성을 수립하였다.

첫째, 정체성으로 친환경 기업과 자전거 고유의 정체성이다. 최근 모빌리티 시장에서 전기 자전거와 스쿠터의 형태적 경계가 모호해짐에 따라, 자전거 고유의 감성을 유지하면서도 수소 기반의 새로운 기술적 가치를 시각화하는 데 주안점을 둔다. 이는 익숙한 형태 속에서 혁신을 지향하는 '친숙하면서도 차별화된' 디자인 전략을 통해 구현한다.

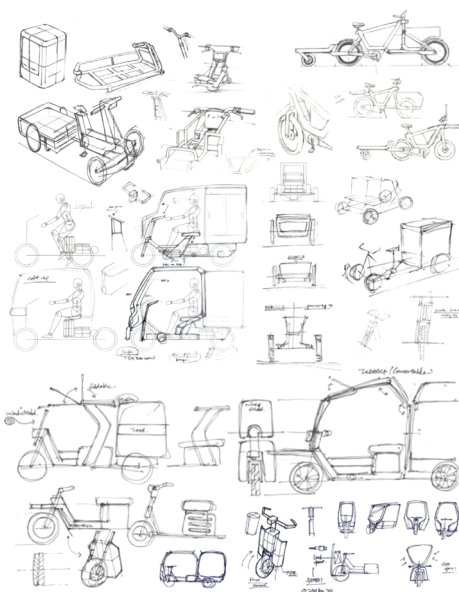
둘째, 구조적 적합성이다. 장거리 운행이 필수적인 물류 환경을 고려하여, 다수의 수소 탱크와 대용량 화물을 동시에 적재할 수 있는 효율적인 레이아웃을 구현한다. 특히, 수소 탱크의 배치 단계부터 유지보수와 카트리지 교체의 편의성을 고려함으로써 상업용 모빌리티로서의 가동률과 효율성을 극대화하는 구조적 적합성을 확보한다.

셋째, 사용자의 인간공학적 배려와 주행 안전성 강화이다. 잦은 하역 작업이 발생하는 물류 환경을 고려하여 사용자가 쉽게 승하차할 수 있는 저상형 차체를 설계한다. 아울러, 도심 내 자동차 및 보행자와 혼재된 주행 환경에서도 안전성을 담보할 수 있는 능동적, 수동적 안전 요소들을 디자인 요소로 통합하여, 기술적 완성도와 운행 신뢰성을 확보한다.

4. 디자인의 실행

4-1. 아이디어 스케치 전개

제안된 4륜 카고바이크 디자인을 구체화하기 위하여 다양한 형태의 아이디어 스케치를 진행하였다. 초기 단계에서는 프레임 구조, 적재 방식, 조향 구조를 중심으로 다수의 스케치를 반복적으로 전개하였으며, 자전거 고유의 구조를 유지하면서도 4륜 기반의 안정적인 물류 운송이 가능한 형태를 도출하고자 하였다. 특히, 카고 적재부의 위치와 크기, 프레임의 연결 방식, 그리고 탑승자의 자세 및 조향부 구성을 중심으로 다양한 조합을 실험적으로 탐색하였다. 과도하게 차량화, 스쿠터화된 형태를 지양하고, 자전거 특유의 간결한 구조와 경량성을 유지하는 데 중점을 두었다.[그림 5]

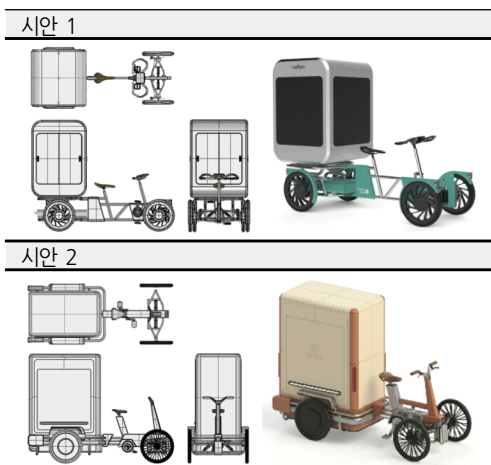


[그림 5] 아이디어 스케치 전개

4-2. 3D 모델링과 렌더링 시안과 탑승자세

종합하여 4륜 구조 기반의 후면 적재(rear-load) 형태를 초기 시안 1, 2를 도출하였다. [표5]

[표 5] 아이디어 초기 시안 전개



시안 1은 상업용 4륜 카고 바이크가 요구하는 물리적, 시각적 안정성을 최우선으로 고려하였다. 전면 프레임을 연장하여 4륜 구동 시스템의 구조적 강인함을 강조하였으며, 라운드 형태의 카고 박스를 결합함으로써 차체와 적재함 사이의 조형적 일체감을 확보하는

데 주안점을 두었다.

시안 2는 복잡한 도심 주행 환경에서의 운용 효율성을 극대화하는 방향으로 설계되었다. 전면 돌출부를 최소화하여 차체의 회전 반경을 줄임으로써 도심 내 기동성과 조향 성능을 향상시켰으며, 수직형 카고 박스를 채택하여 화물 적재 공간의 활용도를 높였다.



[그림 6] 시트포지션 확인

최종 디자인에 앞서 장시간 운행해야 하는 배송 작업자의 육체적 피로도를 최소화하고 작업의 쾌적성을 확보하기 위해 라인 테이프 방식을 통한 사이즈 및 행동 반경 점검을 통하여 탑승자의 인체공학적 주행 자세를 확인하였다.[그림 6]

4-3. 최종 디자인

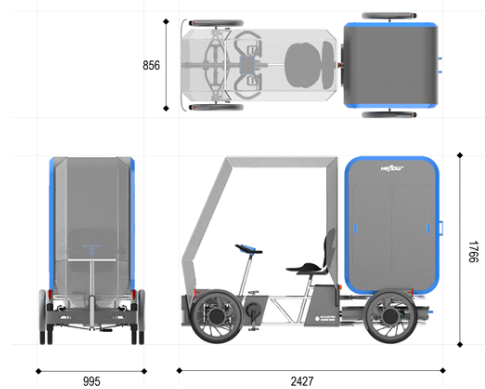
최종 디자인은 단순한 형태의 조합과 직선 라인을 강조하여 상업용 카고바이크 특유의 견고하고 강인한 이미지를 부각하였다.



[그림 7] 최종 디자인

외형적으로는 자전거의 고유한 개방감을 유지하는

기본 구조를 채택하되, 기후 변화에 유연하게 대응할 수 있도록 탈부착식 실드(운전석 하우징)를 적용하여 작업 환경의 쾌적성을 확보하였다. 아울러 도심 내 혼재된 교통 상황에서의 안전한 운행을 돕기 위해 차체 전면에 충격을 완화하는 탄성 소재의 범퍼를 모듈화하고, 직관적인 좌우 방향지시등을 배치하여 모빌리티로서의 완성도와 안전성을 동시에 충족하였다.

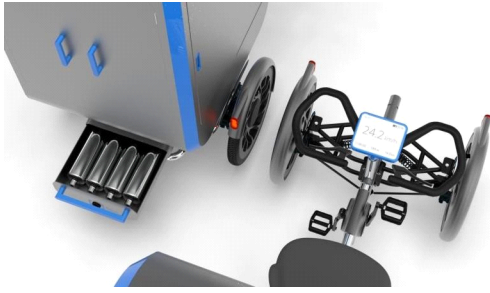


[그림 8] 사이즈 제원

다양한 도심 주행 환경에서 작업자가 유연한 탑승 자세를 취할 수 있도록 인체공학적 형태의 시트와 다목적 투어링 핸들바를 적용하였다. 아울러 적재함 도어 및 수납부의 개폐 방식은 작업자의 실제 화물 조작 동선과 행동 패턴을 분석하여, 반복적인 작업에서도 직관적이고 안전한 사용이 가능하도록 설계하였다.

인체공학적 의자 디자인과 다목적 투어링 핸들바(touring handle bar)를 적용하여 유연한 주행 자세를 지원하도록 설계하였다. 또한, 배송 작업 시 빈번하게 발생하는 승하차 동작의 편의성을 극대화하기 위하여 지상고 455mm의 저상형(low-step) 차체 프레임 적용하였다. 이러한 저중심 설계는 무거운 화물 적재 시 차체의 무게 중심을 낮춰 주행 안정성을 크게 향상시키는 물리적 이점을 제공한다.

동력 시스템의 핵심인 수소 카트리지는 차체 후면 하단에 슬라이딩 구조로 패키징하여 공간 효율성을 극대화하였다. 기본형 모델의 경우 E사의 10L 중형 수소 탱크 4개 (890*650mm)를 탑재하여, 1회 충전으로 최대 500km까지 운행 가능한 비약적인 장거리 주행 능력을 확보하였다.[그림 9]



[그림 9] 수소 탱크와 디스플레이

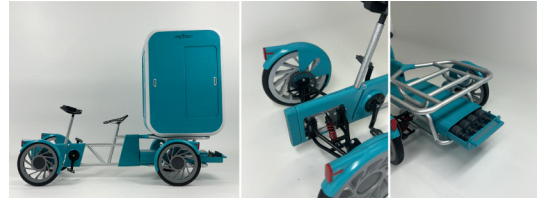
물류 환경의 요구에 따라 수소 탱크를 최대 8개까지 확장 탑재할 수 있는 2단 슬롯 구조가 가능하도록 설계하였다. 차체 하부에는 4륜 시스템의 고하중 지지와 충격 흡수를 위해 더블 위시본(double wishbone) 형태의 서스펜션 구조를 적용하여 노면 대응력을 높였다.

4-4. 디자인 검토

디자인 평가항목에 제시된 세부 평가 지표를 바탕으로, 'E'사의 실무진(대표, 기술이사, 연구원 2명)과 디자인 전문가 그룹 (박사과정 1명, 석사과정 3명)이 참여한 품평회를 진행하였다. 품평회는 '디자인 발표 > 축소 스케일 목업 확인 > 시나리오에 따른 시뮬레이션 > 디자인 체크리스트 평가'로 진행되었다.

먼저 디자인 발표를 통해 3D 모델링, 렌더링 이미지 및 시뮬레이션 영상을 활용하여 연구의 핵심 디자인 전략과 세부 사항을 공유하였다.

이어서, 축소 스케일 모형 검토 단계에서는 [그림 10]과 같이 기본 차체 프레임과 대용량 카고 박스가 결합된 형태를 입체적으로 구현하여, 전체적인 조형적 비례감과 모듈형 적재 시스템의 공간 효율성을 다각도에서 분석하였다. 특히 4륜 카고 바이크의 주행 안정성과 직결되는 하부 서스펜션 및 톨딩 메커니즘의 모형을 통하여, 복잡한 구동 부품의 배치와 부품 간의 물리적 간섭 여부 등 설계 레이아웃의 타당성을 검토하였다. 아울러 차체 후면 하단에 적용된 슬라이딩 방식의 '수소 카트리지 슬롯'을 모형화하여, 기존의 대용량 배터리 시스템을 대체하는 수소 동력계 패키징의 공간적 이점과 카트리지 교체의 구조적 편의성을 확인하였다. 마지막으로 적재함의 경우, 화물 적재 시 작업자의 동선 및 측면 슬라이드 개폐 방식과 후면 쌓여담이 방식을 연계한 대형 화물 입출의 실효성을 종합적으로 검토하였다.



[그림 10] 축소 스케일 목업

축소 모형 관찰에 이어, 제안된 4륜 수소 카고바이크가 실제 라스트마일 물류 환경에 투입된 상황을 가정한 3D 환경 시뮬레이션을 진행하였다. 가상의 도심 가로망과 친환경 수소 충전 허브 등 다양한 인프라에 기기를 배치하여 주변 경관과의 조화를 탐색하였다. 이를 통해 복잡한 도심 속 주행부터 거점 스테이션 정차, 배송지에서의 작업 시나리오까지 시각적으로 구현함으로써, 제안된 디자인의 동선 효율성과 실질적인 적용 가능성을 종합적으로 가능해 보았다. [표 6]

[표 6] 도심 물류 운용 시나리오

시나리오 1: 도심 가로망 주행 및 경관 조화	
상황: 주요 도심의 도로 및 보행로 인접 구역을 주행	
	차체 전폭이 1,000mm 이내로 제한된 모빌리티는 도로 전용 충전 구역에 적절하게 수용된다. 기존 상업용 대형 화물차가 보행자에게 유발하던 위압감과 시각적 맹점을 완화하며, 일상 공간에 안정감을 제공하며 다른 도심 요소들과의 조화를 확인하였다.
시나리오 2: 친환경 인프라 연계 및 정차	
상황: 태양광 패널이 적용된 차세대 수소 충전소에 진입 및 정차	
	개방형 스테이션 환경에서 수소 카트리지를 교체하는 과정에서 사용자의 작업 반경이 독립적으로 확보된다. 교체 및 충전 작업 중 주변 보행자나 타 퍼스널 모빌리티 운전자의 주행 동선에 간섭을 유발하지 않아, 안전하고 신속한 에너지 보급이 가능하다.
시나리오 3: 라스트마일 배송지 하역 동선	
상황: 최종 배송지인 상가나 주거지 앞 임시 정차 구역에 정차	
	차체 후면의 대용량 카고 박스 형태가 좁은 가로망에서도 주변 상점의 입구나 보행자의 통행로를 침범하지 않고 배치된다. 또한, 전면의 운전석 실드가 배송 작업자의 시야 확보 및 독립적인 영역을 확보한다.

끝으로, 목표 제원, 사례 분석, 디자인 가이드라인 도출 과정을 통해 구체화된 핵심 요구 조건들을 바탕으로 디자인 평가 항목을 설계하였다. 평가항목은 산업 디자인의 보편적 평가 척도인 합목적성, 심미성, 독창성, 경제성의 4가지 대분류를 기준으로, 본 연구의 특수성에 맞춘 세부 지표를 다음 [표 7]과 같이 도출하여 실행하였다.

[표 7] 디자인 평가 항목

대분류	평가 항목	세부 내용	적합	비고
합목적성	적재 효율성	적재 공간	○	화물칸의 높이 검토
		하중 분산	○	설계 검토
	수소시스템 적합성	수소탱크배치	●	적합
		시스템 통합	●	구현가능
	인간공학	승하차	●	적합
		탑승 자세	●	적합
		조작성	●	적합
	구조 안정성	안정성	○	무게에 따른 안정성 검토
		전복 방지	○	구조 검토
	안전성	시야	●	적합
		제동	○	무게에 따른 제동 검토
		도심 대응	●	적합
심미성	형태 및 고유성	자전거 구조	●	적합
		조형 완성도	●	적합
독창성	혁신성	차별성	●	적합
		미래 가치	●	적합
경제성	생산 및 구조 효율	구조 단순성	●	적합
		제작 가능성	●	설계 검토

본 평가는 설문을 활용한 합격(●)/불합격(X)/고려(○) 체크리스트 방식으로 진행되었으며, 그 결과 제안된 디자인은 모든 평가 항목에서 도심 물류 환경에 부합하는 것으로 판단하였다. 다만, 적재 화물 공간, 하중 분산, 무게에 따른 안정성, 전복 방지, 제동 정도에 있어서는 실증적인 검토가 필요할 것으로 판단하였다. 따라서, 도출된 형태적 시안이 향후 실제 상용화 단계로 나아가기 위해서는 프로토타입 제작을 통한 실증적 검증이 수반되어야 한다는 세부 의견이 도출되었다.

5. 결론

본 연구는 도심 라스트마일 물류의 탈탄소화 및 효율성 제고를 위해 수소연료전지 기반 4륜 카고바이크

를 제안하였으며, 연구 과정에서 도출된 핵심 통찰은 다음과 같다.

첫째, 수소 에너지 패키징의 소형적, 구조적 효율성을 규명하였다. 기존 리튬이온 배터리의 증가로 인한 주행 효율 저하 문제를 해결하기 위해, 수소 시스템의 압축적 패키징을 적용하였다. 이를 통해 차체의 용적 증가 없이 고출력 기동성을 극대화하는 독자적인 소형 기반을 마련하였다. 둘째, 도심 환경에서의 공간적 실효성과 친환경 가치를 입증하였다. 가상 운송 시뮬레이션을 통해, 4륜 플랫폼이 복잡한 가로 체계 내에서 독립적 유휴 공간을 확보하며 주변 동선 간섭 없이 운용됨을 확인하였다. 이는 주행 중 순수한 물만을 배출하는 친환경성과 결합하여, 도심 경관에 유기적으로 순응하는 탈탄소 물류 모빌리티로서의 타당성을 확인하였다. 셋째, 물류 현장의 특수성을 고려한 인간공학적 디자인 가이드라인을 정립하였다. 차체의 물리적 저중심 설계가 주행 안정성을 확보하는 동시에, 작업자의 신체 부하를 최소화하는 인간공학적 편의성을 유기적으로 만족시킴을 확인하였다.

이는 전통적 자전거와 이륜차 사이의 형태적 경계를 재정의하고, 향후 수소 카고바이크 디자인이 지향해야 할 기술적, 소형적 방향성을 제시한 실무적 표준 사례로서 학술 가치를 지닌다. 그러나 본 연구는 수소 동력 시스템의 구조적 특성을 반영한 디자인 전개와 개념적 방향성 제시에 집중하였다는 한계를 지닌다. 향후 본 시안이 실제 상용화 단계로 진입하기 위해서는 도심 내 수소 충전 인프라 확충이라는 사회적 선결 과제와 더불어, 구조적, 공학적 설계 검증 및 대용량 화물 적재 시의 동역학적 실증 테스트와 차체에 적용된 재생 카본 부품의 양산 공법 고도화 등 다각적인 공학적 후속 연구가 병행되어야 할 것이다.

오늘날 이동수단은 단순한 이동을 넘어 친환경 스마트 모빌리티라는 새로운 패러다임으로 급격히 전환되고 있다. 이러한 변화 속에서 자전거 기반의 경량 운송 수단은 라스트마일 물류 시장의 핵심 거점으로 주목받고 있으며, 본 연구가 제안한 수소 연료전지 4륜 카고 바이크는 전통적인 페달링 기반의 자전거와 동력 기반의 이륜차 사이의 경계를 재정의하는 혁신적 모델로서 산업적 의미를 지닌다. 향후 본 연구의 결과물이 친환경 물류 인프라 구축의 구체적인 가이드라인으로 활용되기를 기대한다.

참고문헌

1. 김성민, 오관용, 신지환, 박성근, 김대진, '전기 카고바이크 도입에 따른 사회적 편익 분석: 김천시 도심형 카고바이크 배송 실증사업 사례를 중심으로', 한국물류과학기술학회, 물류과학기술연구, 2025
2. 우종운, 유시복, '연택트 시대, 라스트 마일 자율주행배송', 한국자동차공학회, 오토저널, 2020
3. 이수빈, 임옥택, 'The Optimization on Fuel economy of Hydrogen Fuel Cell Bicycle Performance Based with Driving Analysis', 한국자동차공학회, 한국자동차공학회 지회 학술대회 논문집, 2024
4. 이시창, '자전거 유형별 디자인 형태 분석에 관한 연구 : 선형 요소 중심으로', 한국디자인문화학회, 한국디자인문화학회지, 2011
5. Katherine Orchard, Celine Cluzel, 『Cycle Freight Study』, Transport for London, 2018
6. www.deloitte.com
7. www.gminsights.com
8. www.iea.org
9. www.keei.re.kr
10. www.ridemag.co.kr
11. www.seagate.com